

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

М.Д. Казяев, А.В. Вохмяков, Е.В. Киселев, Д.И. Спитченко

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Расчет внешнего теплообмена в пламенных печах всегда осложняется недостаточными знаниями характеристик конвективного теплообмена.

В статье представлена методика и результаты экспериментального исследования внешнего теплообмена с возможностью расчета характеристик конвективного теплообмена в вертикальной камерной печи. Даны рекомендации по применению представленной методики и результатов исследований.

Ключевые слова: *внешний теплообмен, вертикальная камерная печь, конвективный теплообмен, методика исследований, результат расчетов, рекомендации.*

Calculation of the external heat exchange in the combustion furnaces is always complicated because of insufficient knowledge of the convective heat transfer characteristics.

The present article demonstrates a procedure and results of the experimental investigation of the external heat transfer in the vertical chamber furnace in combination with the calculation of the convective heat transfer characteristics. The article also includes the recommendations explaining how to use the procedure and results of the above-mentioned investigation.

Keywords: *external heat exchange, vertical chamber furnace, convective heat transfer, a procedure of investigation, results of calculations, recommendations.*

Современные конструкции нагревательных и термических печей оснащают скоростными горелками, обеспечивающими высокие скорости движения газов в рабочем пространстве и, как следствие, усиление конвективной составляющей сложного внешнего теплообмена.

В целях совершенствования методов расчета тепловой работы печей необходимо иметь данные о характеристиках теплообмена, получаемых при экспериментальных исследованиях сложного внешнего теплообмена.

Такие исследования были проведены на вертикальной печи для термообработки роторов турбин, представленной на рис. 1.

Футеровка печи выполнена из керамо-волоконистых блоков. Печь оснащена двенадцатью скоростными рекуперативными горелками фирмы «Elster Kromchroeder» номинальной тепловой мощностью 250 кВт каждая.

Исследования тепловой работы печи проводили при нагреве поковки ротора турбины массой 28 т в целях нормализации по сложному режиму, приведенному на рис. 2.

На поверхность поковки были установлены восемь термопар, а в рабочем пространстве печи в каждой из пяти зон управления находились две термопары. По показаниям указанных термопар были проведены расчеты осредненных температур греющей среды и металла на различных временных участках температурного режима.

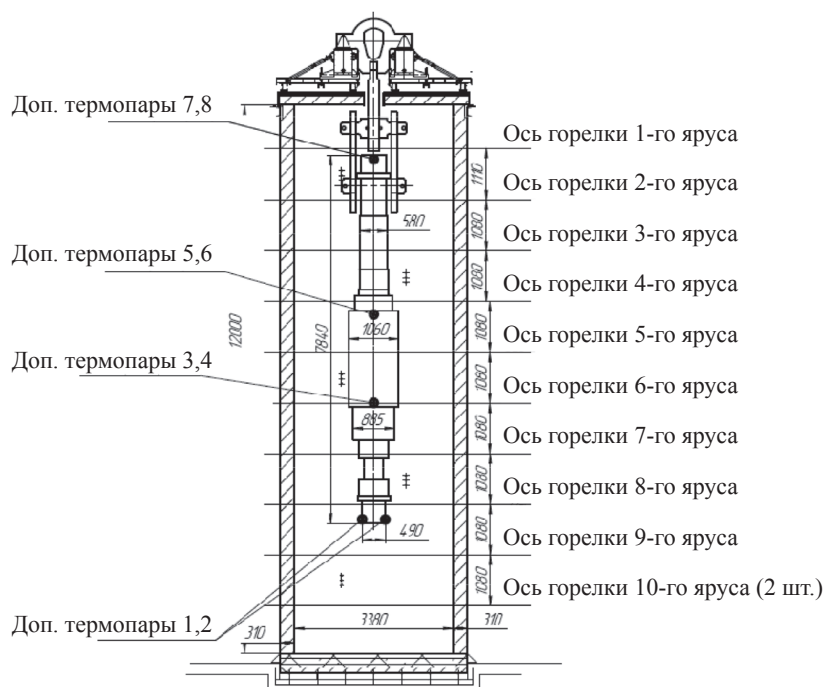


Рис. 1. Схема вертикальной термической печи с установкой опытного ротора массой 28 т и размещение основных (печных) и дополнительных термопар

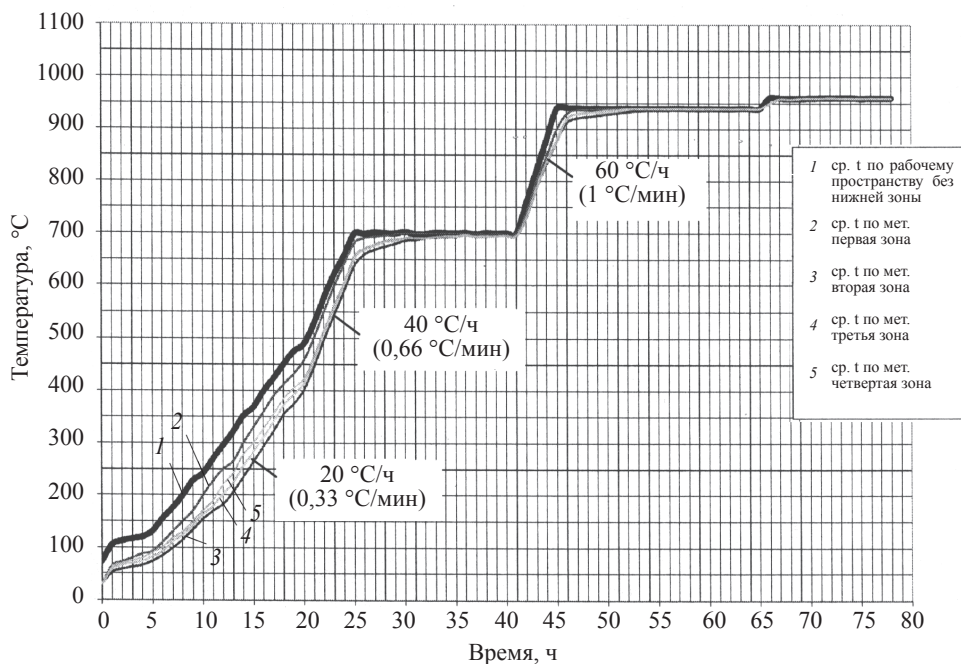


Рис. 2. Температурный режим печи при нагреве ротора массой 28 т

Указанные данные были использованы в расчетах сложного внешнего теплообмена.

Ниже приведена методика исследования сложного внешнего теплообмена, позволяющая рассчитывать передачу теплоты от печной среды к поверхности металла отдельно для лучистой и конвективной составляющих внешнего теплообмена.

На каждом временном участке рассчитывается приращение среднemasсовой температуры поковки ротора, и по ней определяется количество теплоты, полученное металлом:

$$\Delta Q_m = G_m \bar{c}_m \Delta t_m, \text{ кДж.} \quad (1)$$

Далее рассчитывают плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом,

$$\bar{q}_{m\Sigma} = \frac{\Delta Q_m}{F_m \Delta \tau}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2)$$

где G_m – масса металла, кг; \bar{c}_m – средняя теплоемкость металла, кДж/(кг·К); Δt_m – приращение среднemasсовой температуры металла, °С; F_m – поверхность металла, м²; $\Delta \tau$ – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

При наличии величины $\bar{q}_{m\Sigma}$ можно рассчитать средний суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла (по балансу теплоты)

$$\bar{\alpha}_\Sigma = \bar{q}_{m\Sigma} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}), \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (3)$$

Затем по известным геометрическим и теплофизическим характеристикам печи можно рассчитать среднюю плотность теплового потока излучением

$$\bar{q}_{m,л} = C_{\text{гкм}} \left[\left(\frac{\bar{T}_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right], \text{ кВт/м}^2, \quad (4)$$

где $C_{\text{гкм}}$ – приведенный коэффициент излучения в системе газ – кладка – металл, Вт/(м²·К⁴).

Лучистый тепловой поток позволяет рассчитать коэффициент лучистого теплообмена

$$\bar{\alpha}_л = \bar{q}_{m,л} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}), \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (5)$$

По разности между $\bar{q}_{m\Sigma}$ и $\bar{q}_{m,л}$ можно определить плотность теплового потока конвекцией

$$\bar{q}_{mк\Sigma} = \bar{q}_{m\Sigma} - \bar{q}_{m,л}, \quad (6)$$

и далее – коэффициент конвективного теплообмена

$$\bar{\alpha}_{m,к} = \bar{q}_{m,к} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}), \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (7)$$

Учитывая сложный температурный режим печи и переменное поперечное сечение поковки ротора, производили расчет средней суммарной плотности теплового потока для всей поковки с учетом долевого массового коэф-

фициента каждой части изделия, для каждой зоны печи в отдельности, для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{\Sigma} = \left(\frac{G_1}{G_{\Sigma}} \right)_I q_{\Sigma I} + \left(\frac{G_2}{G_{\Sigma}} \right)_{II} q_{\Sigma II} + \left(\frac{G_3}{G_{\Sigma}} \right)_{III} q_{\Sigma III} + \left(\frac{G_4}{G_{\Sigma}} \right)_{IV} q_{\Sigma IV}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{G_1}{G_{\Sigma}} \right)_I \dots \left(\frac{G_4}{G_{\Sigma}} \right)_{IV}$ – долевые массовые коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи; G_{Σ} – масса всей поковки ротора; $q_{\Sigma I} \dots q_{\Sigma IV}$ – значения плотностей суммарных тепловых потоков в каждой зоне печи, рассчитанные по показаниям термопар, установленных на металле и в рабочем пространстве печи.

Среднее значение лучистой составляющей внешнего теплообмена рассчитывали для всей печи с учетом долевого поверхностного коэффициента каждой части изделия, для каждой зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{\Sigma} = \left(\frac{F_1}{F_{\Sigma}} \right)_I q_{\Sigma I} + \left(\frac{F_2}{F_{\Sigma}} \right)_{II} q_{\Sigma II} + \left(\frac{F_3}{F_{\Sigma}} \right)_{III} q_{\Sigma III} + \left(\frac{F_4}{F_{\Sigma}} \right)_{IV} q_{\Sigma IV}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{F_1}{F_{\Sigma}} \right)_I \dots \left(\frac{F_4}{F_{\Sigma}} \right)_{IV}$ – долевые поверхностные коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи; F_{Σ} – общая площадь поверхности поковки ротора; $q_{\Sigma I} \dots q_{\Sigma IV}$ – расчетные значения плотностей тепловых потоков излучением для каждой части изделия в каждой зоне печи.

В таблице приведены результаты измерений и расчета параметров теплообмена в камерной вертикальной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками. Анализ данных позволяет сделать некоторые выводы, касающиеся расчета теплообмена в камерной печи.

Прежде всего, следует констатировать тот факт, что применение скоростных горелок резко увеличивает конвективную составляющую внешнего теплообмена: доля конвекции в общем внешнем теплообмене в данном случае составляет в среднем во всем интервале температур 61 %.

**Результаты измерений и расчета параметров теплообмена
в камерной вертикальной печи**

Интервал температур печи, °C	Средние температуры, °C		Плотности тепловых потоков, Вт/м ²			Коэффициенты теплообмена, Вт/(м ² ·K)		$q_{\Sigma K}/q_{\Sigma L}$
	\bar{t}_r	\bar{t}_n	\bar{q}_{Σ}	$\bar{q}_{\Sigma L}$	$\bar{q}_{\Sigma K}$	$\bar{\alpha}_L$	$\bar{\alpha}_K$	
100 – 500	311	239	4143	1556	2587	21,6	35,9	1,663
500 – 700	616	563	12270	4297	7973	81,1	150,4	1,855
700 – 940	820	788	11466	4921	6545	153,8	204,5	1,330

С ростом температуры печи увеличиваются обе составляющие внешнего теплообмена: лучистая – на 35–40 %, конвективная – на 60–65 %.

Объяснение этому может быть увеличение скорости нагрева ротора по мере перехода от нагрева при температуре печи в интервале 100–500 °С к нагреву в интервале 700–940 °С, при котором возрастает тепловая нагрузка печи, и происходит увеличение количества продуктов сгорания и кратности циркуляции газов. Как показали наши исследования тепловой работы других типов печей, кратность циркуляции газов, создаваемая скоростными горелками, может составлять $K_{\text{ц}} = 8\text{--}12$ [1–3].

Следует подчеркнуть, что полученные соотношения конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена можно применять для расчетов суммарных плотностей тепловых потоков только в случаях, подобных конструктивной обстановке, изображенной на рис. 1, которая характеризуется низким коэффициентом заполнения рабочего пространства печи металлом

$$K_3 = V_{\text{м}} / V_{\text{р.п}},$$

где $V_{\text{м}}$ – объем нагреваемого металла, м³; $V_{\text{р.п}}$ – объем рабочего пространства печи, м³.

В данном случае коэффициент заполнения рабочего пространства вертикальной печи составлял $K_3 = 0,045$.

Следует также отметить, что вертикальные термические печи всегда работают с низкими коэффициентами заполнения рабочего пространства металлом. Это обусловлено тепловой обработкой индивидуальной металлической продукции (роторов турбин, крупных валков прокатных станов и проч.), которая требует особо качественного нагрева с высокой степенью равномерности температуры печных газов и поверхности нагреваемого металла, что вообще характерно для камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, и особенно для печей термической обработки изделий.

Поскольку расчет конвективного теплообмена в сложной конструктивной обстановке всегда представляет большие трудности, то получение экспериментальных данных на действующих печах является необходимой и важной работой.

Представленный в статье материал исследований является частью общего направления изучения конвективного теплообмена в печах различных конструкций, проводимого на кафедре теплофизики и информатики в металлургии Уральского федерального университета.

Получение большого количества данных о соотношении конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена позволяет более точно рассчитывать суммарные тепловые потоки, передаваемые нагреваемому металлу, используя расчет лучистого теплообмена

$$q_{\text{м}\Sigma} = q_{\text{м.л}} \left(1 + \frac{q_{\text{м.к}}}{q_{\text{м.л}}} \right),$$

где $q_{\text{м.л}}$ – расчетная плотность теплового потока излучением; $q_{\text{м.к}}/q_{\text{м.л}}$ – экспериментально полученное соотношение конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена.

Затронутая в статье тема особенно важна при конструировании современных камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, оснащаемых скоростными горелками, создающими прецедент резкого увеличения конвективной составляющей теплообмена. Поэтому любые экспериментальные исследования, проводимые на действующих печах, позволяют развивать и совершенствовать теорию теплообмена и разрабатывать новые конструкции современных печей, обеспечивающих качественный и производительный нагрев металла.

Список использованных источников

1. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Спитченко Д.И., Казяев Д.М. Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: Сб. докл. Международной научно-практич. конф. В 2 ч. Часть 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 246–259.
2. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Спитченко Д.И., Казяев Д.М. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Сб. материалов VII Международной научно-практич. конф. посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло. – М: Издат. дом МИСиС. НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 224–235.
3. Спитченко Д.И., Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Киселев Е.В., Казяев Д.М. Сборник докладов Международной научно-практич. конф. «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 367–370.